



Etude d'une matrice de photodiodes a avalanche associee a des cristaux scintillants (LSO et LuAP)

P. Depasse, M. Goyot

► To cite this version:

P. Depasse, M. Goyot. Etude d'une matrice de photodiodes a avalanche associee a des cristaux scintillants (LSO et LuAP). 2003, pp.23. in2p3-00014122

HAL Id: in2p3-00014122

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00014122>

Submitted on 14 Nov 2003

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude d'une matrice de photodiodes à avalanche associée à des cristaux scintillants (LSO et LuAP)

1 – Introduction

Le projet initié par Crystal Clear Collaboration du Cern de construire des prototypes de micro-tomographes à émission de positons destinés à des expérimentations sur le petit animal, implique l'utilisation de nouveaux moyens de photodétection ainsi que l'utilisation de nouveaux cristaux scintillants rapides. Ce projet est repris pour la région Rhône-Alpes sous l'appellation IMOTHEP.

Deux possibilités de photodétection sont étudiées à l'IPNLyon :

- * Une première voie est basée sur l'utilisation de photomultiplicateurs MultiAnodes, de son électronique et de l'acquisition associée.

- * La deuxième voie est l'utilisation de matrices de photodiodes silicium à avalanche.

Ces deux photosenseurs sont couplés aux même cristaux scintillants : du LSO ou du LuAP.

Ce rapport présente les premiers résultats obtenus avec ce deuxième dispositif de détection, d'abord une caractérisation approfondie du système en électronique classique, ensuite les premiers résultats obtenus avec une électronique rapide.

2 – Dispositif expérimental

2.1 Matrice de photodiodes à avalanche (Avalanche PhotoDiode, APD).

Le type testé est une matrice de 4x8 photodiodes à avalanche d'Hamamatsu [1]. La zone active de chaque APD est de $1.6 \times 1.8 \text{ mm}^2$.

Cette matrice est composée de 2 blocs indépendants de 16 APDs associés dans un même boîtier, que l'on dénommera par la suite matrice A et matrice B. Les APDs sont polarisées en inverse. La cathode est commune aux 16 APDs, chaque anode est indépendante. La matrice est montée dans une boîte blindée et étanche à la lumière. On repère les APDs par la colonne (A -> H) et la rangée (1 -> 4 comme indiqué figure 1). C'est au voisinage de A1 et de H4 que se font les connexions de polarisation (jusqu'à 400 V environ).

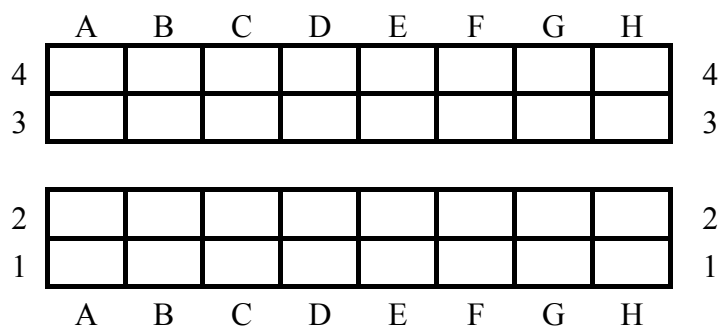


Fig. 1 : Dénomination des cellules, matrice vue de dessus.

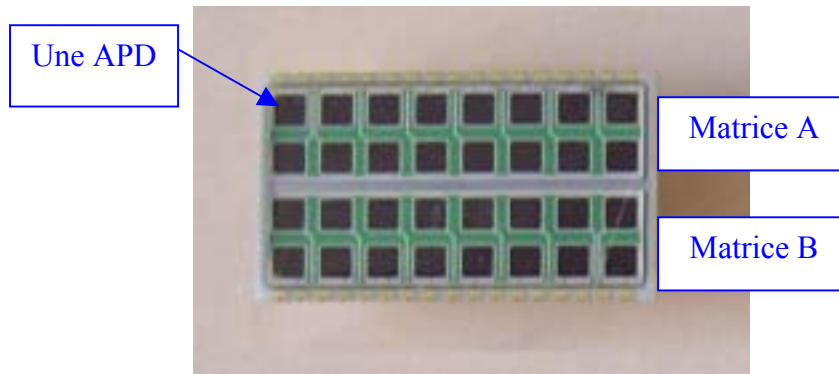


Photo 1 : La matrice de 4x8 APDs, vue de dessus.

2.2 Mécanique.

L'ensemble est disposé dans une boîte étanche à la lumière. L'essentiel de la mécanique à l'intérieur de cette boîte est présenté ci-dessous.

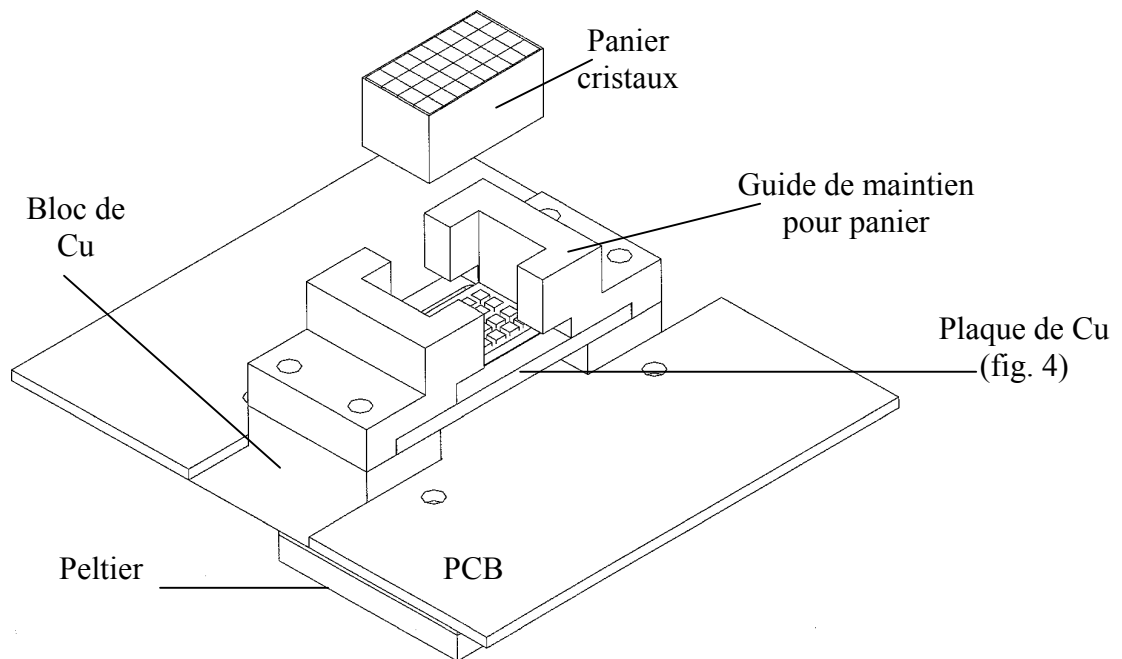


Fig. 2 : Dispositif expérimental.

Un élément Peltier de 1 pouce de côté est placé sous un bloc de cuivre massif dont la température sera contrôlée et pilotée. Sur ce bloc est fixé le support en cuivre (fig. 4) de la matrice d'APDs.

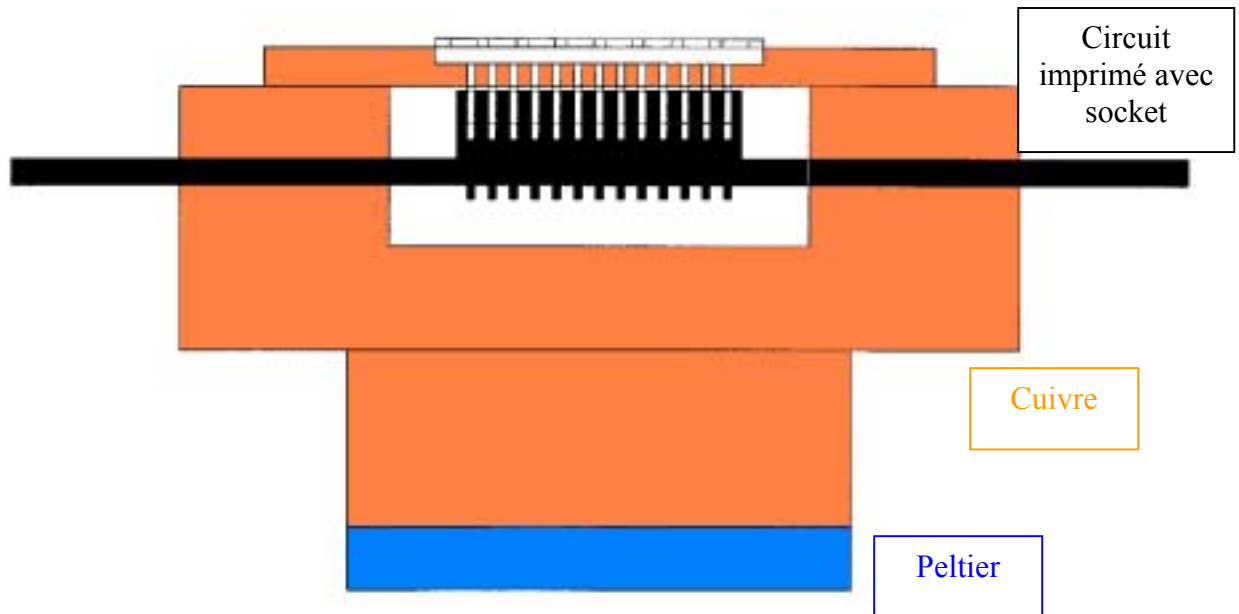


Fig. 3 : Dispositif expérimental vue de profil.

Un matériau élastomère [2] isolant électrique et conducteur thermique de 0,13 mm d'épaisseur est placé au fond de la plaque de cuivre supérieure. La matrice, une fois insérée dans son support, arrive au ras de la plaque supérieure (voir photographie 2).

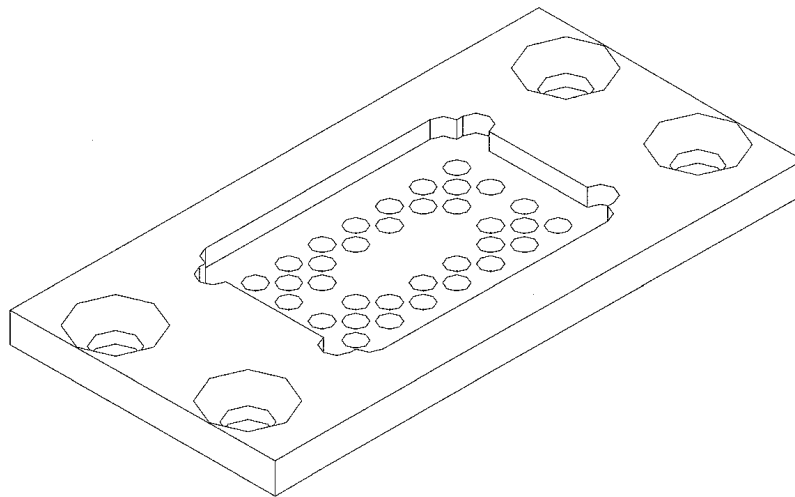


Fig. 4 : Plaque de cuivre supérieure.

La connectique est réalisée par un circuit imprimé placé autour de l'ensemble.

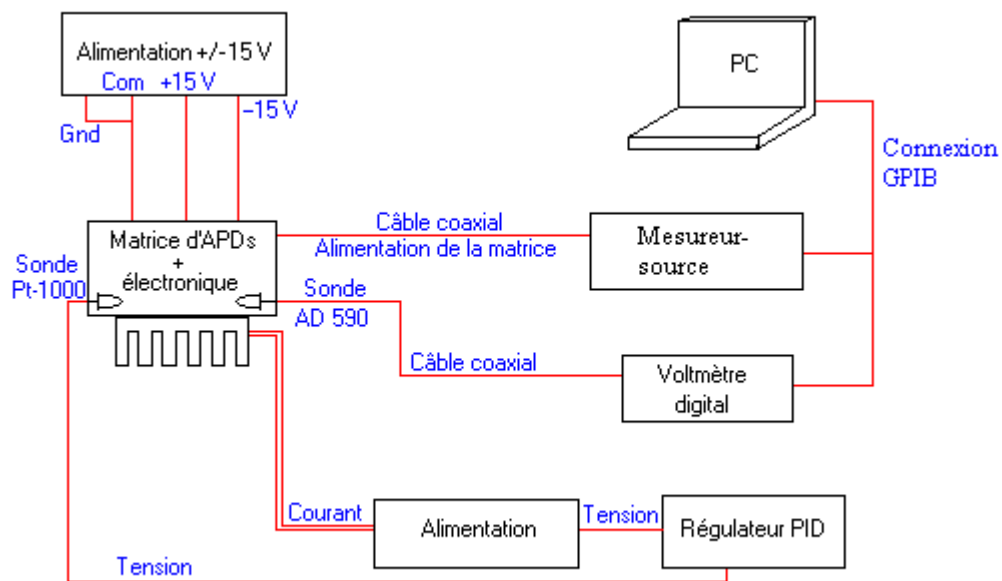


Fig. 5 : Dispositif expérimental.

La tension de polarisation de la matrice d'APDs est fournie par une unité source-mesure Keithley 2410. Cette alimentation pilotée en tension indique la valeur du courant généré. La limite maximale de ce courant délivré est ajustable (compliance).

Un capteur de température AD590 est fixé sur le radiateur en cuivre. Sa lecture est donnée par un voltmètre digital Keithley 192.

Le PC utilise un logiciel développé sous LabView 5.1.

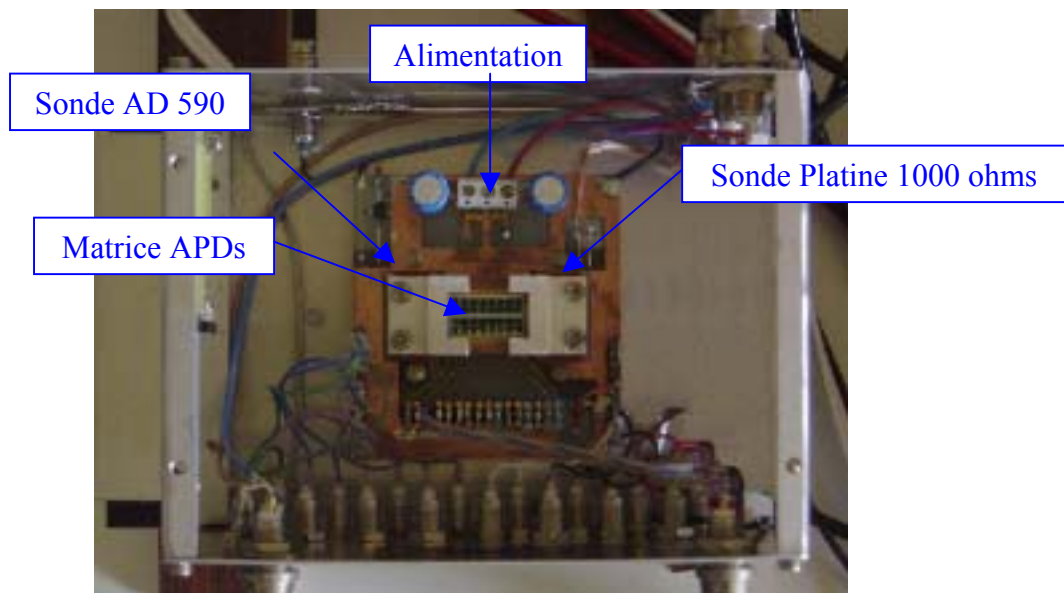


Photo 2 : Matrice enchâssée dans un bloc métallique.

Gestion de la température

Afin de maîtriser parfaitement la température, une boucle électronique de régulation est réalisée en utilisant un élément Peltier au format de 1 pouce par 1 pouce, pour maintenir la température du silicium de la matrice la plus constante et la plus homogène possible.

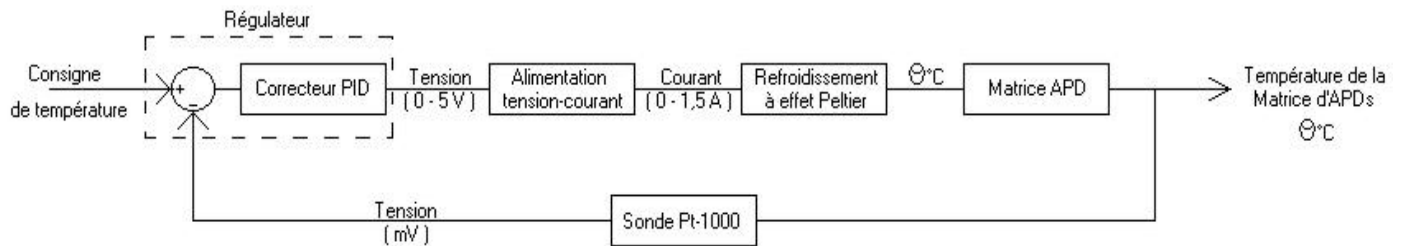


Fig. 6 : Schéma d'asservissement et de régulation de la température de la matrice d'APDs.

- Le régulateur PID est un appareil OMEGA i-Series Model CNI 32 54. Un logiciel i-Series fourni permet de configurer le système. Il permet de programmer les différentes valeurs des actions Proportionnelle, Intégrale et Dérivée soit en manuel, soit en automatique (il faut alors une phase d'apprentissage du système).
- L'alimentation analogique tension-courant est un appareil MC 6015C qui fonctionne en deux modes : en mode tension ou courant. Dans notre cas, l'alimentation délivre un courant proportionnel à la tension d'entrée, courant qui peut aller jusqu'à 1,5 A.
- Le refroidissement à effet Peltier permet de maintenir une température uniforme sur toute la surface de silicium de la matrice. L'écart de température entre les deux faces de l'élément Peltier est proportionnel à l'intensité de courant qui le traverse.
- Une sonde Platine 1000 Ohms (classe A) scellée sur le bloc en cuivre est utilisée comme capteur de régulation.

Grâce à cette régulation, la stabilité obtenue au cours des différentes expériences est meilleure que le dixième de degré (différence entre valeur maximale et valeur minimale).

Gestion de l'humidité

Les courants mesurés étant de l'ordre de quelques nA, nous avons rapidement remarqué que l'humidité était un facteur important à considérer pour maîtriser le plus possible les courants de fuite (courants de surface). Dans toutes les mesures qui vont suivre, des sachets de silicagel sont placés à l'intérieur de la boîte. Les mesures deviennent alors reproductibles.

3 – Mesures statiques sur la matrice seule

3.1. – Capacités

On utilise un capacimètre doté d'un module permettant de mesurer une capacité sous 500 V (modèle QuadTech 7600 modifié).

L'évolution de la capacité mesurée en fonction de la tension d'alimentation est présentée ci-dessous pour l'une des 32 APDs (A1). Le comportement est très symptomatique de la déplétion ou non des zones de silicium. En dessous de 230 V (tension de coude), les APDs se "voient" entre elles. Ce n'est qu'au-delà de 230 V qu'elles deviennent indépendantes et que leur capacité individuelle se stabilise. La mesure a été réalisée pour les 32 APDs : la valeur moyenne obtenue est de 11,3 pF et l'écart type : 0,5 pF.

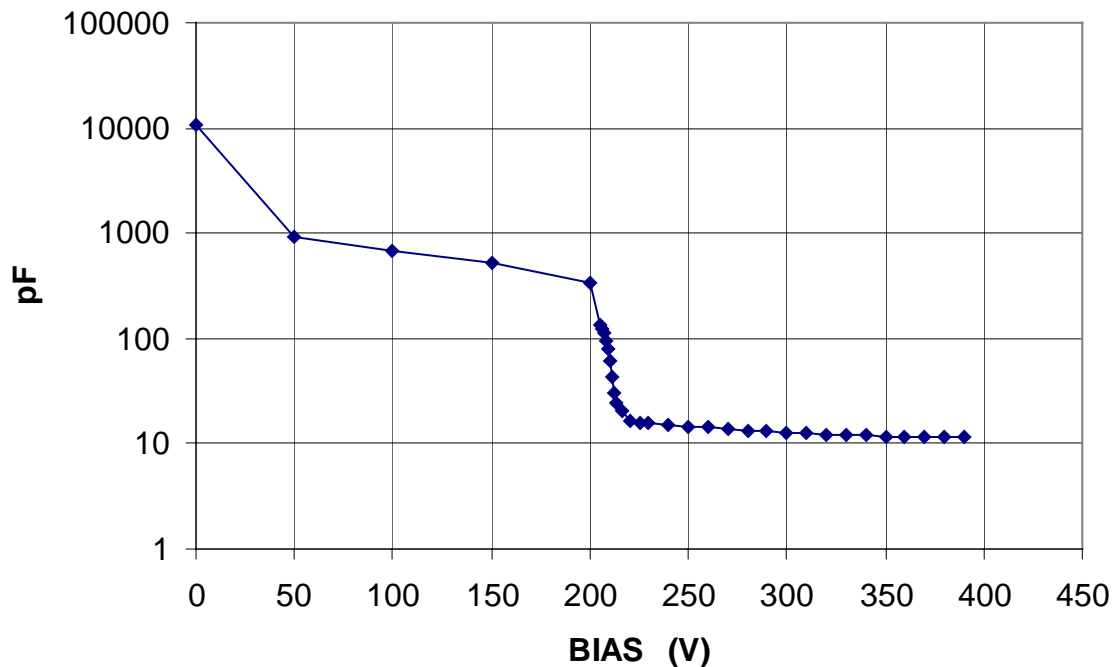


Fig. 7 : Evolution de la capacité mesurée en fonction de la tension appliquée, pour l'APD A1.

3.2. – Tension de coude

La mesure de la tension de coude pour les 32 cellules de la matrice (la tension de coude est définie ici comme étant la tension pour laquelle $C = 20$ pF, tension à partir de laquelle C évolue très faiblement) donne une valeur moyenne de 233 V (avec un écart-type de 8 V).

Sur la figure 8, on note une structure très marquée, liée à la distance du point d'entrée de la haute tension (au voisinage de A1 et H4).

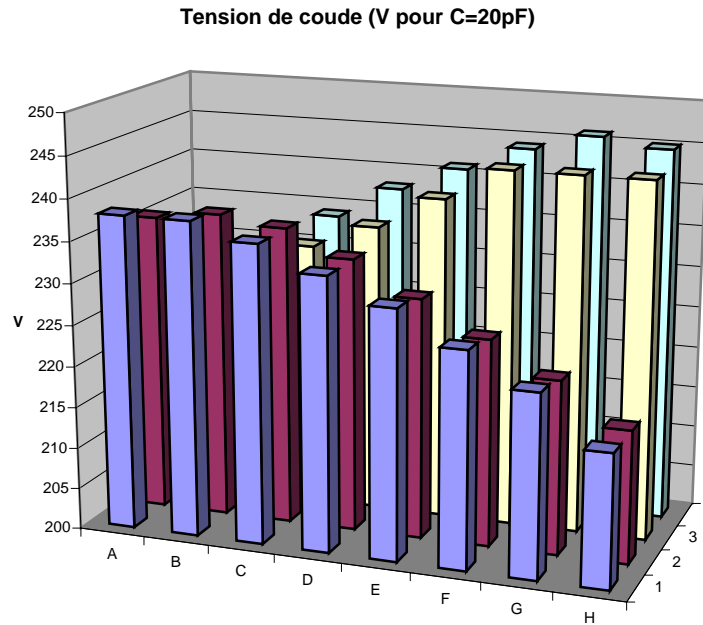


Fig. 8 : Valeurs de la tension de coude pour les 32 cellules.

En dessous de cette tension de coude, rappelons que le comportement individuel des photodiodes n'existe plus. Une simple mesure U , I permet d'estimer une résistance d'environ 1150 Ohms entre photodiodes adjacentes.

3.3. – Tension de claquage ($V_{breakdown}$)

Définie comme étant la tension pour laquelle la compliance de l'alimentation est atteinte (fixée à 10 microampères dans notre cas), elle vaut en moyenne 395 V avec un écart-type de 7 V. Dans ce cas-ci également, on note une structure liée à la géométrie de la matrice, les rangées centrales 2 et 3 "claquent" à une tension plus faible que les rangées extérieures (figure 9).

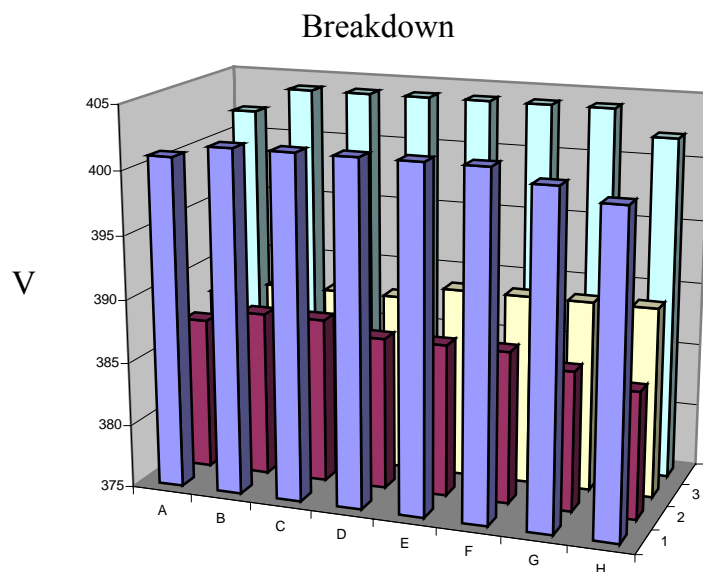


Fig. 9 : Valeurs de la tension de claquage pour les 32 cellules.

3.4. – Gain global à température constante, pour une demi-matrice de 16 APDs.

La mesure du gain se fait classiquement, en comparant l'évolution du courant délivré en fonction de la tension appliquée, sous illumination (lumière d'une diode bleue diffusée par un bloc de plexiglas mat), après avoir pris soin de soustraire le courant d'obscurité (I_{dark}). Le gain 1 est obtenu pour une tension inverse de quelques dizaines de volts (en fait, on calcule une moyenne sur plusieurs points).

$$\text{Gain} = \frac{(I_{\text{illum}} - I_{\text{dark}})_{\text{tension appliquée}}}{(I_{\text{illum}} - I_{\text{dark}})_{50 \text{ V}}}$$

Les points expérimentaux de la figure 10 sont limités à 380 V, valeur pour laquelle certaines cellules de la matrice ont atteint leur tension de claquage, empêchant ainsi tout fonctionnement correct de la matrice au-delà de cette tension. L'alimentation Keithley est programmée pour limiter le courant à 10 μA . Dans la suite, nous travaillerons souvent à 370 V.

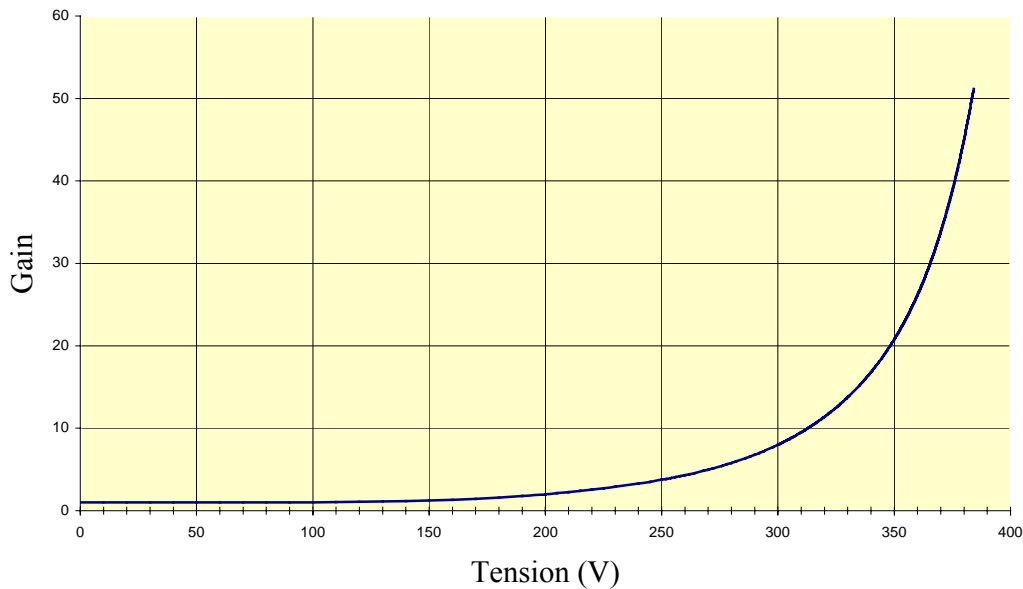


Fig. 10 : Courbe de gain mesurée pour une demi-matrice de 16 APDs, à 23 °C.

3.5. – Dispersion du gain pour une tension fixée à 370 V.

La difficulté d'établir une courbe de gain absolu pour une cellule individuelle provient de la définition du gain 1 pour cette cellule. En effet, en dessous de la tension de coude, les 16 cellules sont liées et on ne peut établir un gain de 1 que pour cet ensemble de cellules. Nous procédons donc en 2 étapes : nous calculons un gain absolu entre 250 V et 50 V pour les 16 cellules et ensuite un gain entre 250 V et 370 V pour chaque cellule individuelle. La température est fixée à 20°.

$$\text{Gain absolu cellule} = \text{Gain individuel } 370/250 * \text{Gain matrice } 250/50.$$

$$\text{Gain cellule} = \frac{(I_{\text{illum}} - I_{\text{dark}})_{\text{cellule } 370 \text{ V}}}{(I_{\text{illum}} - I_{\text{dark}})_{\text{cellule } 250 \text{ V}}} * \frac{(I_{\text{illumTOT}} - I_{\text{darkTOT}})_{250 \text{ V}}}{(I_{\text{illumTOT}} - I_{\text{darkTOT}})_{50 \text{ V}}}$$

Les valeurs de gain sont représentées figure 11.

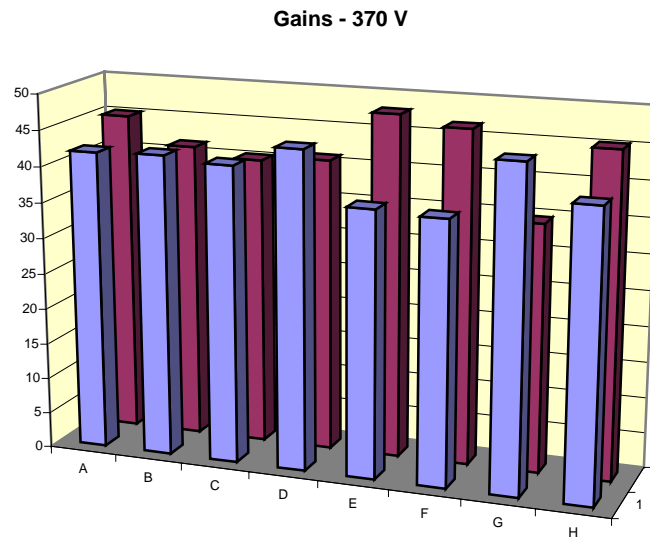


Fig. 11 : Valeurs de gain pour les 16 cellules de la demi-matrice, à 20 °C.

La valeur moyenne obtenue est : 41.9 avec un écart-type de 3.7.

3.6. – Homogénéité des cellules

Pour estimer la dispersion de cellule à cellule, le courant individuel de chaque cellule est comparé à la valeur globale du courant des 16 cellules divisé par 16. L'expérience se fait à 20°, sous une tension de 370 V.

$$\text{Facteur de dispersion} = \frac{(I_{\text{illum}} - I_{\text{dark}})_{\text{cellule}}}{\left[\frac{I_{\text{illumTOT}} - I_{\text{darkTOT}}}{16} \right]}$$

Si on considère les 16 cellules, on obtient une valeur moyenne de 1.009, un écart-type de 0.044. On note de nouveau une structure liée à la géométrie, qui privilégie la zone centrale (figure 12). Le plus grand écart observé par rapport à la valeur 1 est de 8 %.

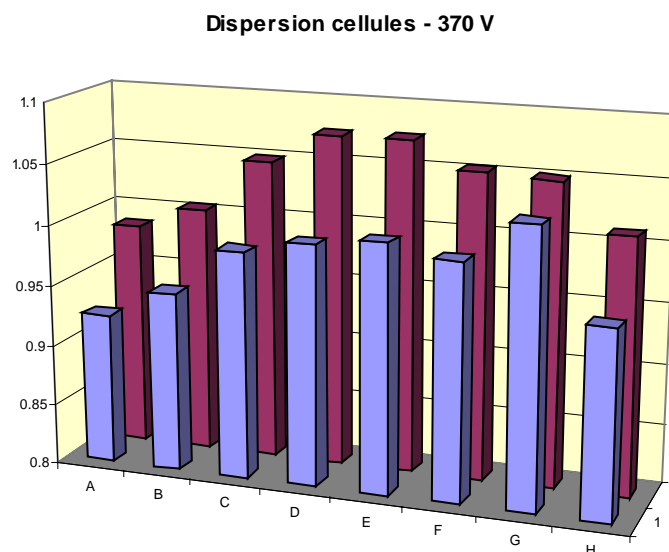


Fig. 12 : Variation de réponse des 16 cellules.

3.7. – Influence de la température

Le courant d'obscurité augmente avec la température. Néanmoins, le libre-parcours moyen des électrons diminue lorsque la température augmente. Donc, assez paradoxalement, le gain diminue lorsque la température augmente, ce qui se traduit par une diminution du courant d'illumination lorsque la température augmente.

La matrice est polarisée à 370 V.

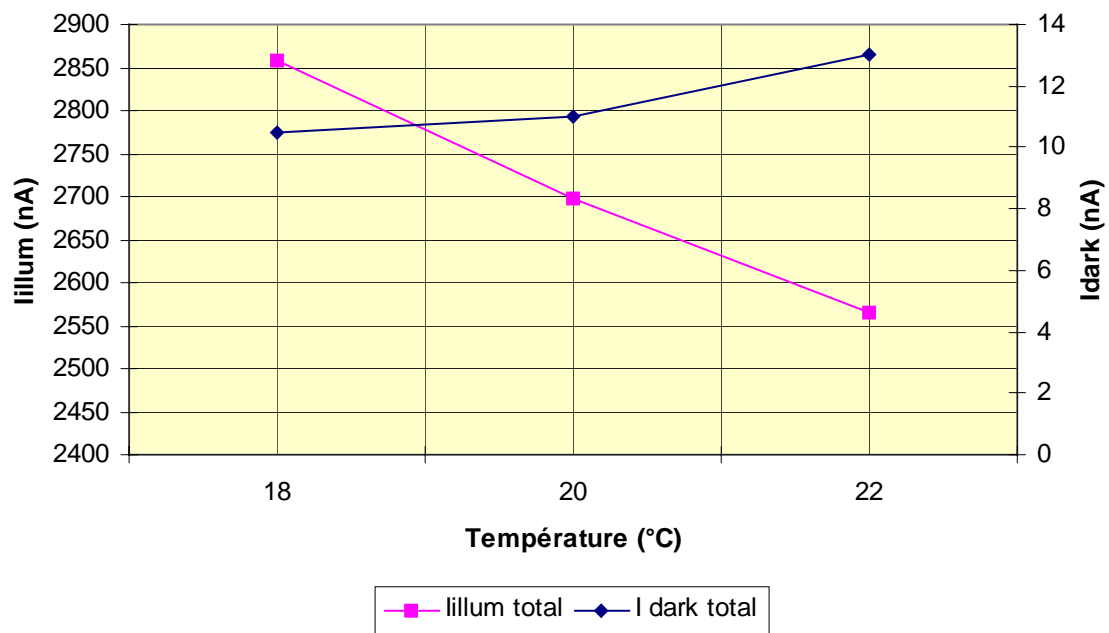


Fig. 13 : Evolution des courants en fonction de la température, pour une APD.

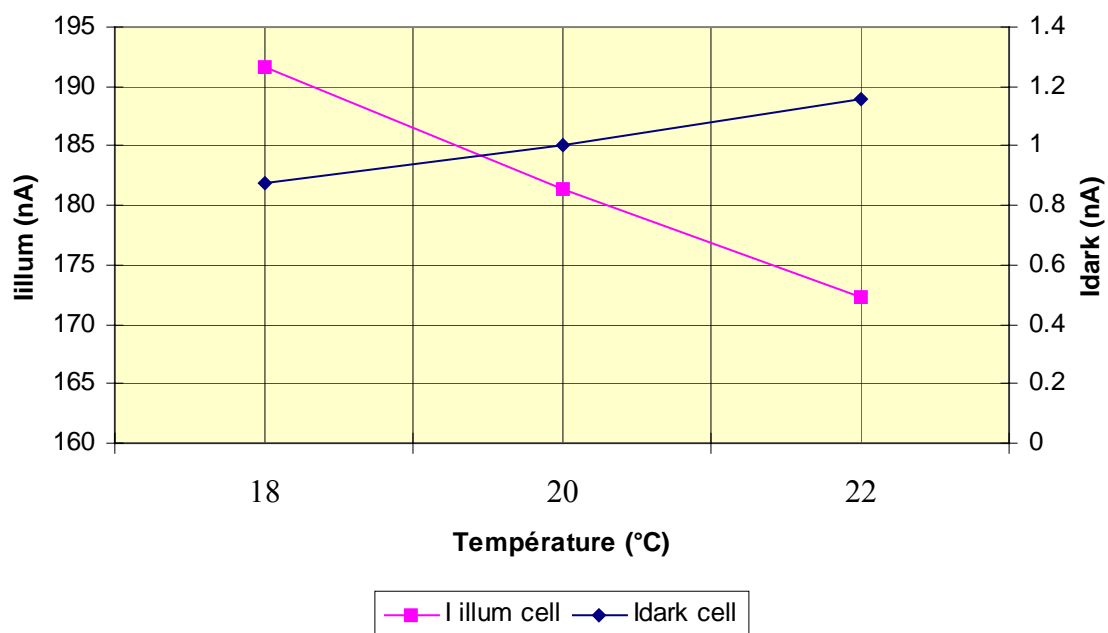


Fig. 14 : Evolution des courants en fonction de la température, pour 16 APDs.

4 – (Demi)-Matrice utilisée dans la détection de la scintillation de cristaux

4.1. – Cristaux

Nous utilisons 16 cristaux de LSO (Lu_2SiO_5) de $2 \times 2 \times 10 \text{ mm}^3$. Nous disposons également de 8 cristaux de LuAP (LuAlO_3), aux dimensions identiques. Les cristaux de LSO et de LuAP ont été achetés par la collaboration Crystal Clear du Cern à CTI pour les LSO et en Arménie (A. Petrossian via le LPCML : Ch. Pedrini et Ch. Dujardin) pour les LuAP, qui sont des cristaux prototypes.



Photo 3 : Bloc de 16 cristaux placés dans un panier de tyvek/aluminium.

Afin de collecter le maximum de lumière et limiter le couplage optique entre cristaux, nous les avons séparés entre eux par trois couches :

- une couche de tyvek (marque déposée par Dupont de Nemours) de 140 microns , un matériau blanc où les fibres sont entremêlées dans tous les sens, assurant une bonne diffusion.
- ensuite, nous avons une feuille d'aluminium (13 microns) qui assure l'isolation optique entre les cellules.
- et une autre couche de tyvek (140 microns).

Dans un premier temps, nous utilisons exclusivement des cristaux de LSO.

Une fois la matrice de cristaux déposée sur les APDs (une mince couche de graisse optique Rhodorsil 47V est déposée), nous installons un cache noir parallélépipédique de façon à placer la matrice et les cristaux dans une obscurité totale.

4.2. – Sources radioactives

On a utilisé essentiellement :

- le sodium 22 ($\text{Na } 22$) : 511 keV, gamma de 1274,54 keV.
- le césium 137 ($\text{Cs } 137$) : gamma de 661.66 keV.

4.3. – Electronique

Une électronique "lente" est d'abord utilisée : on utilise un préamplificateur de charges [3] associé à un amplificateur de mise en forme (ORTEC 452). L'impulsion en sortie est analysée par une carte d'acquisition Nucleus insérée dans le système PC. Un exemple de mise en forme d'une injection de charges provenant d'un générateur d'impulsions (courbe bleue, trace 1) via une capacité d'injection de 4 pF est donné dans la figure 15.

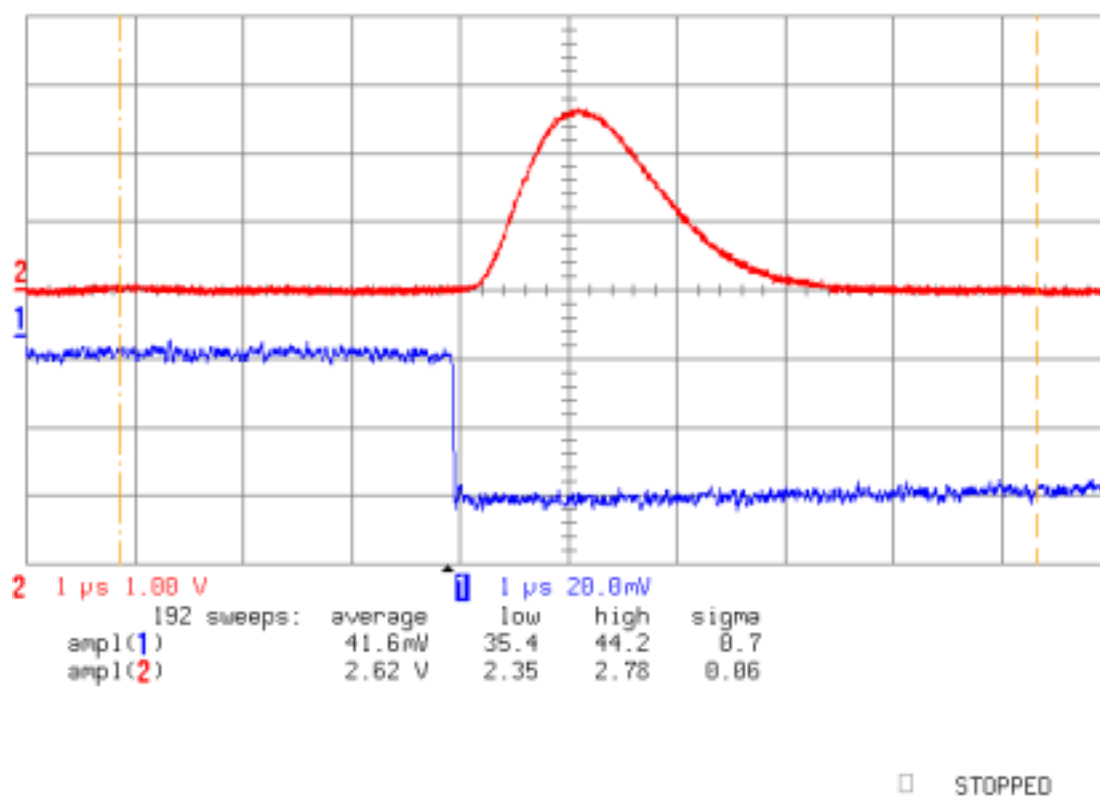


Fig. 15 : Réponse de la chaîne électronique à une injection de charges.

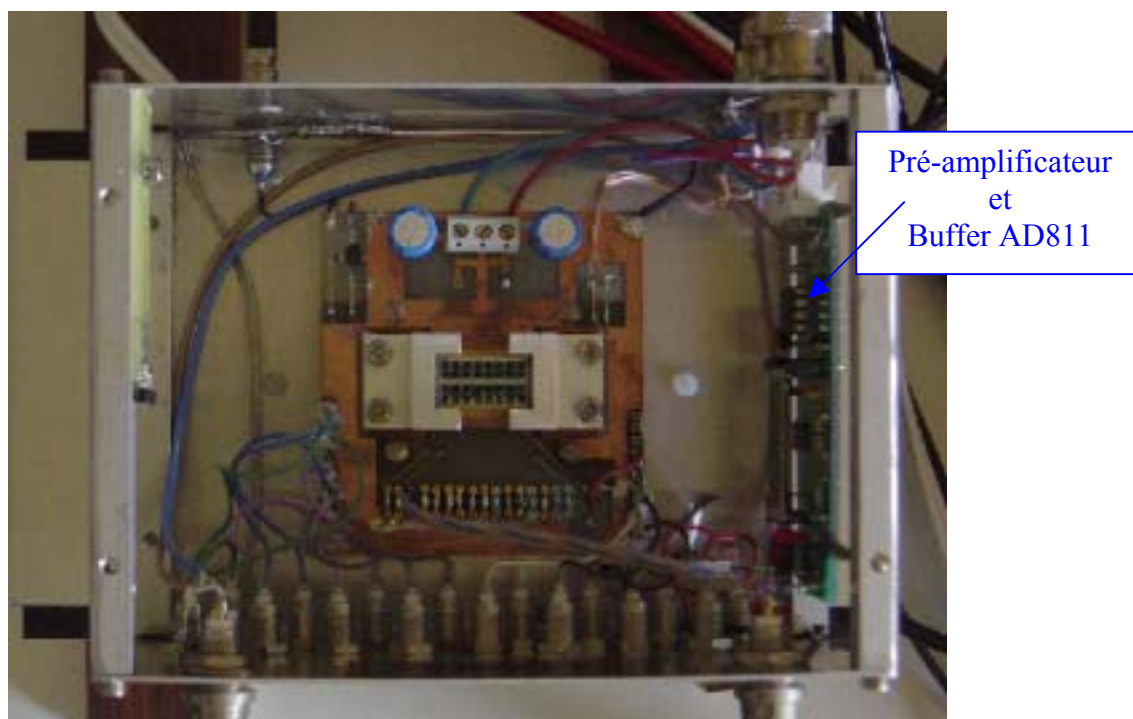


Photo 4 : Boîtier avec l'électronique "lente".

Préalablement, nous calibrons la chaîne électronique.

Pour cela, nous utilisons une diode PIN de 1 cm^2 (gain de 1) alimentée sous 30 V. Nous utilisons le même réseau de filtrage de l'alimentation qui sera utilisé pour la matrice d'APDs (R de $1 \text{ M}\Omega$ et C de 100 nF).

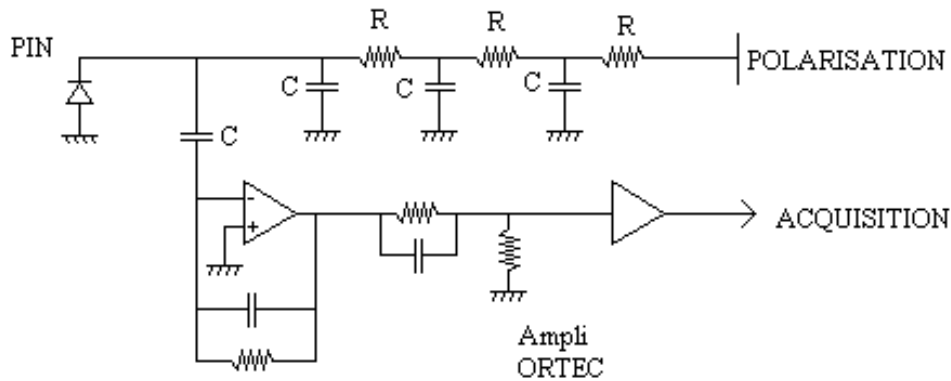


Fig. 16 : Chaîne électronique utilisée.

Nous calibrons avec l'Américium ($59,54 \text{ keV}$) et le Cobalt 57 ($122,06 \text{ keV}$), sachant qu'il faut 3.62 eV pour créer une paire dans le silicium.

Nous remplaçons ensuite la diode PIN par la matrice d'APDs et connectons le préamplificateur côté cathode, récoltant ainsi l'impulsion de charges des 16 APDs (sur lesquelles sont placés 16 cristaux de LSO). Un condensateur $100 \text{ nF} / 500 \text{ V}$ découple la partie haute tension de la partie préamplificateur.

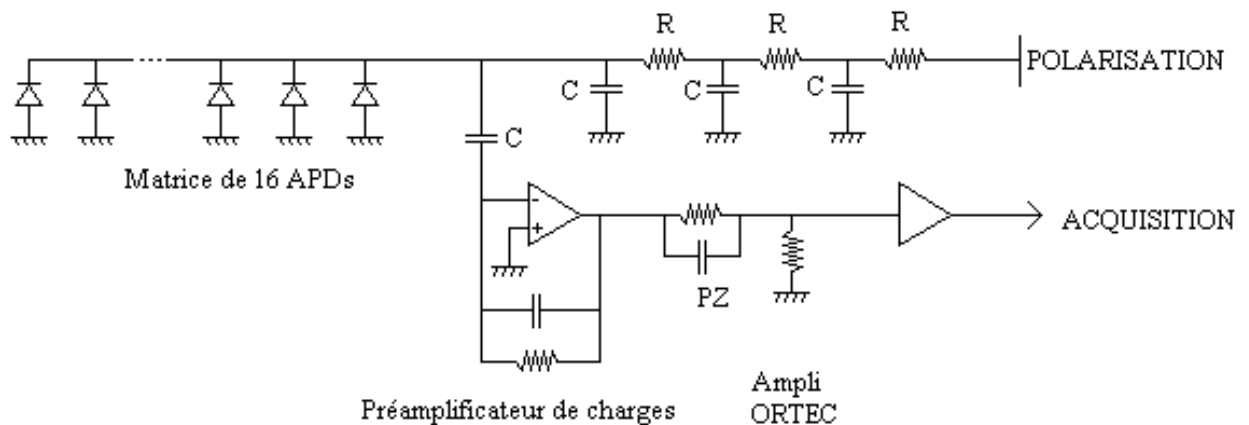


Fig. 17 : Connexion de l'électronique côté cathode commune.

En sortie du préamplificateur de charges, nous avons un réseau de compensation de pôle-zéro (PZ).

L'amplificateur-filtre ORTEC donne un gain final pour permettre une acquisition par la carte Nucleus sur une gamme $0\text{-}10 \text{ V}$. La constante de temps de filtrage utilisée est $0,5 \text{ microseconde}$.

4.4. - Dépendance en fonction de la température (tension constante : 370 V)

Température	18°C	19°C	20°C
Canal du pic du Na 22 (511 keV)	368	356	340
Canal du pic du Cs 137 (661,66 keV)	480	465	448
Ordonnée à l'origine	-10	-13	-28
Rapport Cs / Na	1,296	1,295	1,293

Tab. 1 : Evolution du rapport pic du césium/pic du sodium en fonction de la température.

L'ordonnée à l'origine s'obtient, pour chaque expérience, par une calibration avec un générateur d'impulsions.

Le rapport théorique des énergies Cs / Na est égal à 1,295.

Matrice 16 APDs à 370V (20°C)

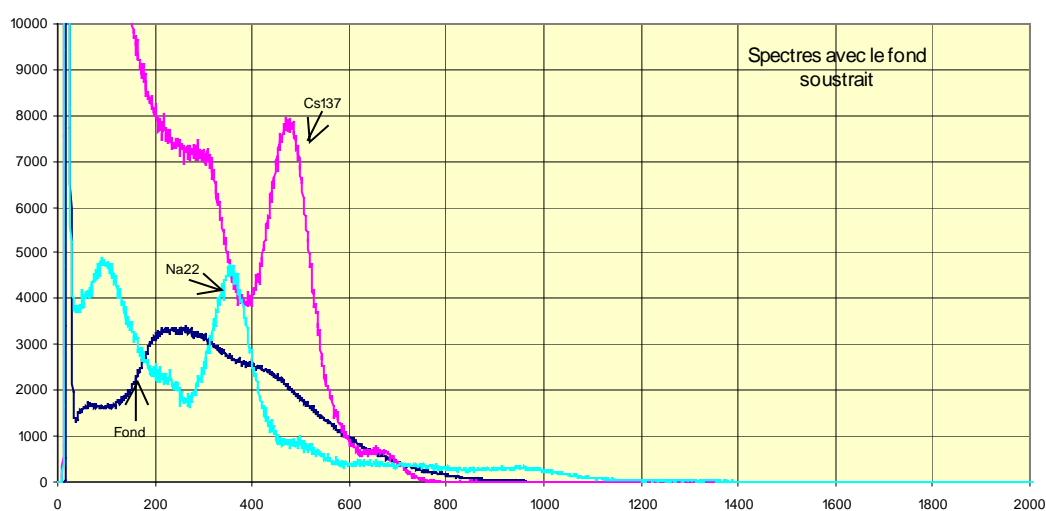


Fig. 18 : Exemple de spectres obtenus.

La résolution (ajustement gaussien du pic qui donne σ , divisé par la valeur correspondant au maximum), est de 9,0 % pour le Cs137 et de 11,0 % pour le Na22 (370 V, 20°).

4.5. - Dépendance en fonction de la tension à température constante (20°C)

Tension	365 V	370 V	375 V
Canal du pic du Na 22 (511 keV)	571	351	424
Canal du pic du Cs 137 (661,66 keV)	751	468	556
Ordonnée à l'origine	-39	-48	-24
Rapport Cs / Na	1,295	1,293	1,295

Tab. 2 : Evolution du rapport du pic du césium/ pic du sodium en fonction de la tension.

Remarque : pour éviter la saturation du convertisseur, le gain de l'amplificateur-filtre ORTEC est réduit lorsque l'on passe de 365 V à 370 V.

4.6. - Etude de cellules individuelles

Les 8 cristaux centraux de LSO sont remplacés par 8 cristaux de LuAP.

Les charges sont collectées sur l'anode d'une des cellules, les autres cellules étant reliées à la masse. Le couplage avec le préamplificateur est en mode continu.

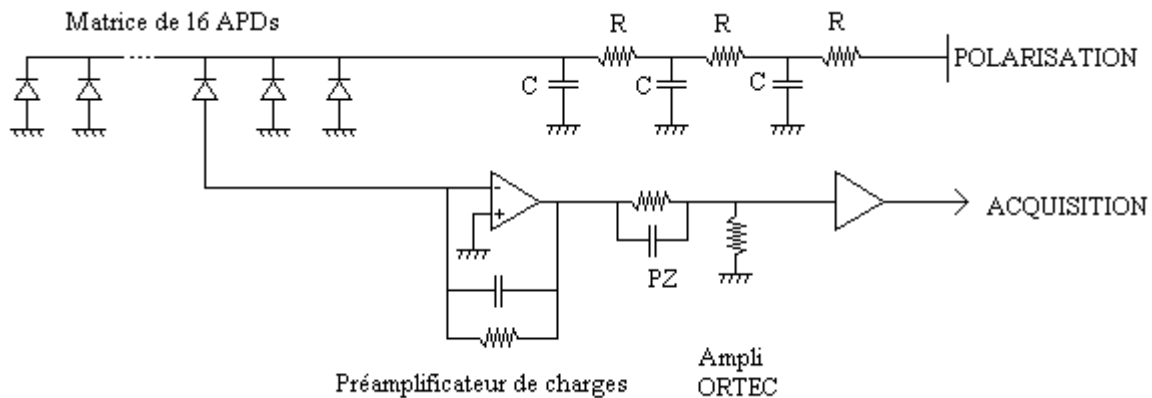


Fig. 19 : Connexion de l'électronique côté anode, pour une cellule individuelle.

4.6.1. Résultats avec le LSO.

En tenant compte de la calibration de la chaîne électronique à l'aide de la diode PIN et de l'intercalibration des gains de l'ORTEC, nous arrivons à la conclusion que le 511 keV donne 73000 électrons (ou qu'il faut 7 eV pour créer une paire électron-trou).

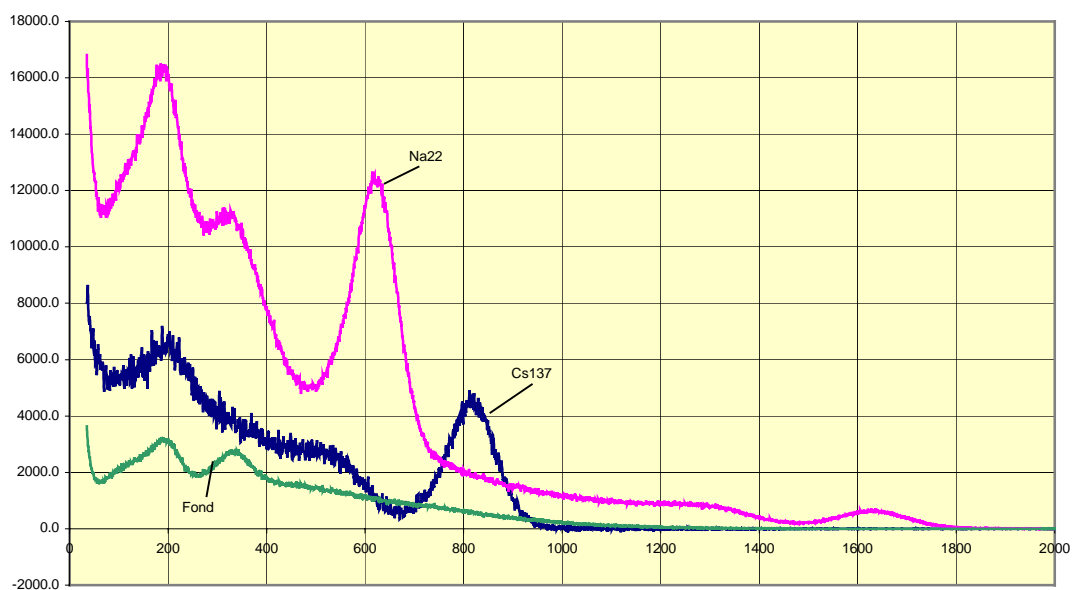


Fig. 20 : Spectres (fond soustrait) obtenus pour une cellule de la matrice.

Sur la figure 20, pour le Na22, outre le 511 keV, le 1274 keV ressort également. Dans le spectre du fond apparaissent les décroissances naturelles du Lutétium 176 : émission de 307 keV, 202 keV (le pic de 88 keV est noyé dans le bruit).

Nous estimons à 30 coups/s le nombre de coups issus de la radioactivité naturelle des cristaux que nous utilisons.

La meilleure résolution obtenue est de 7,1 % pour le Na22 (370 V, 20°). Elle peut se dégrader jusqu'à 13 % suivant la cellule considérée.

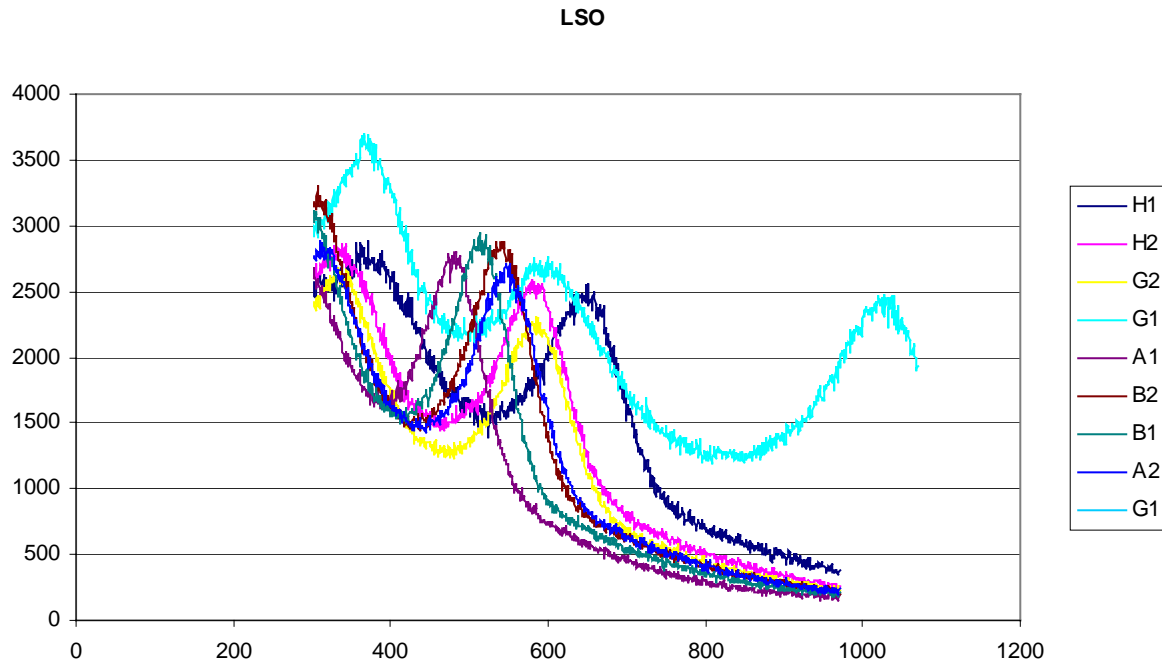


Fig. 21 : Spectres de Na22 pour les 8 cellules de LSO, 370 V, 20 °C.

On note la présence d'un cristal de LSO deux fois plus lumineux (il a été vérifié que le facteur 2 ne provenait pas d'une photodiode à avalanche, la dispersion de la réponse APD ne varie pas de plus de 8 % par rapport à la valeur moyenne).

Position moyenne des 7 autres pics : 556, sigma de 52 canaux. La distribution est homogène à mieux de 10 %.

4.6.2. Résultats avec le LuAP.

Le LuAP émet à 365 nm (420 nm pour le LSO) et a un temps de décroissance plus court (11 ns ou 17 ns selon les auteurs au lieu de 40 ns pour le LSO).

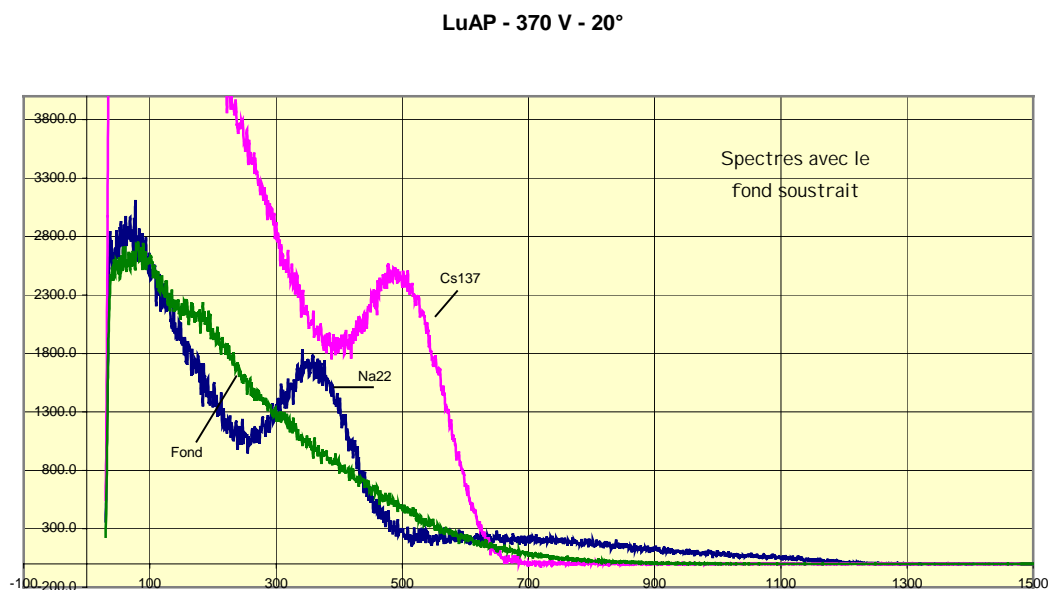


Fig. 22 : Spectres obtenus pour la meilleure cellule de LuAP.

La résolution, supérieure à 20 %, est beaucoup moins bonne que pour le LSO.

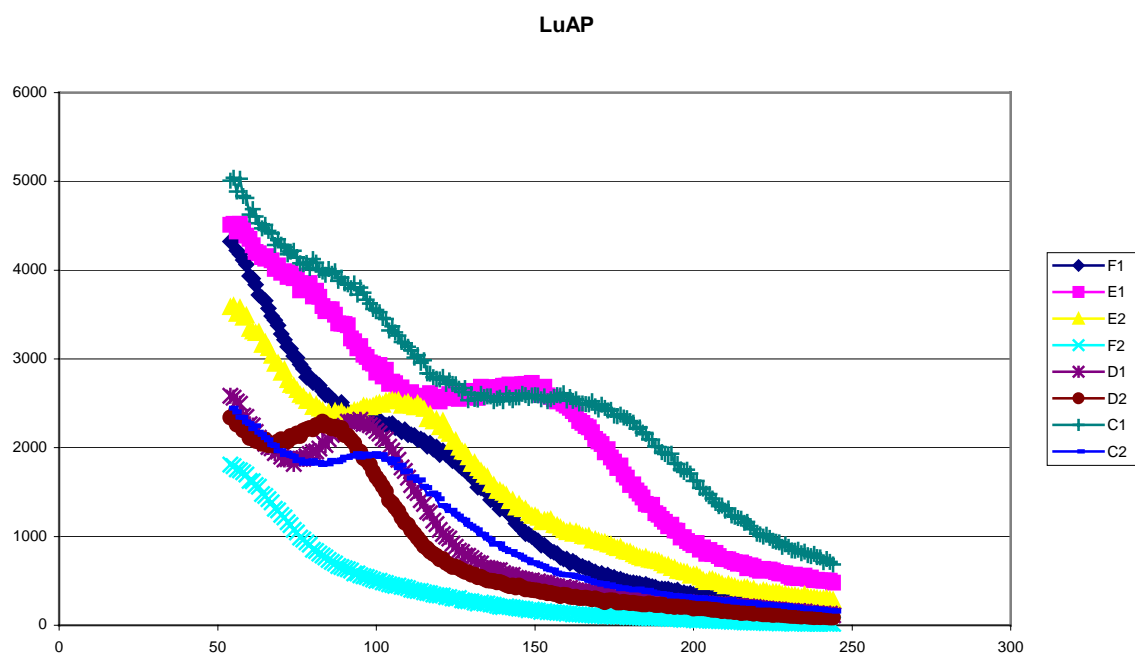


Fig. 23 : Spectres de Na22 pour les 8 cellules de LuAP, 370 V, 20 °C.

Il s'agit en général plus d'épaulements que de pics. Le gain n'est pas le même que celui de la figure précédente. La cellule F2 n'est pas exploitable.

Position moyenne des 7 autres "pics" : 114, écart-type de 29 canaux. La variation d'un cristal à l'autre est trop importante. Il est à noter que la concentration en ions Cérium variait de 0,1 à 0,4 % dans le lot que nous avons utilisé. Le taux de lumière des cristaux de LuAP par rapport à celui des cristaux de LSO variait de 15 à 40 %.

La figure suivante présente la position des pics (Na22) obtenus avec le LSO et le LuAP. Une calibration avec le générateur d'impulsions permet de traduire la position des pics en électrons.

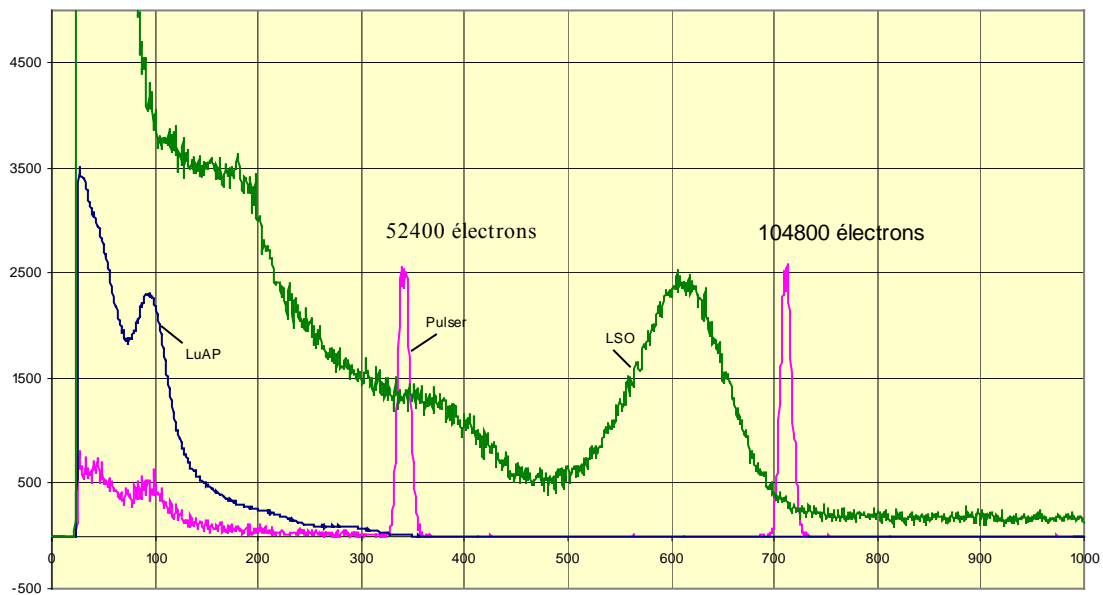


Fig. 24 : Comparaison LSO-LuAP.

5 – Electronique rapide

5.1. Présentation du circuit utilisé : LNCP-62 [4]

Ce circuit intégré est conçu comme démonstrateur d'une technologie bipolaire UHF1 dans une application de lecture de photodiodes silicium. Développée initialement par HARRIS, ses performances en hautes fréquences, 8 GHz pour les transistors NPN et 4 GHz pour les PNP, sont bien adaptées à l'amplification rapide à faible consommation.

Quatre fonctions sont réalisées sur le chip pour permettre différentes configurations de couplage avec le détecteur, de filtrage et de gain.

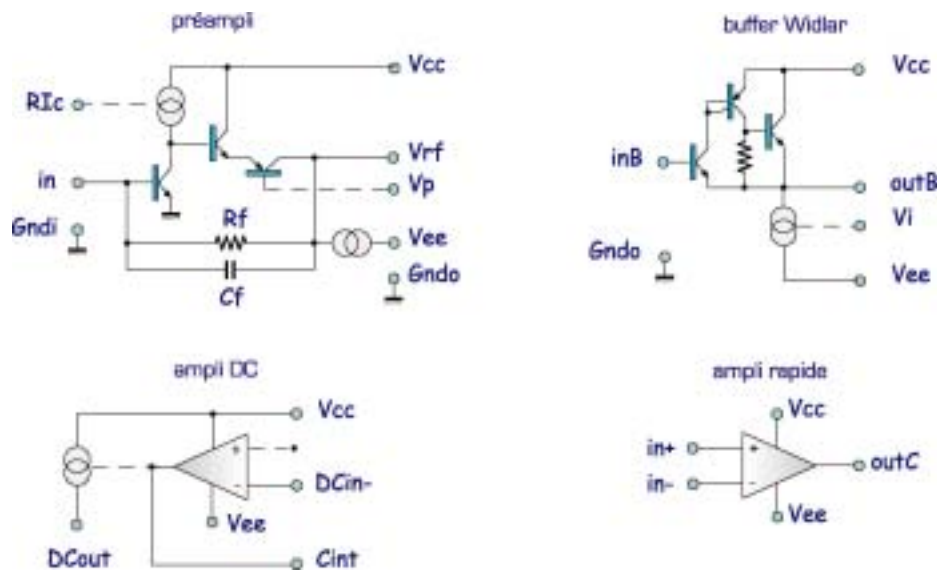


Fig. 25 : Fonctions indépendantes intégrées au circuit.

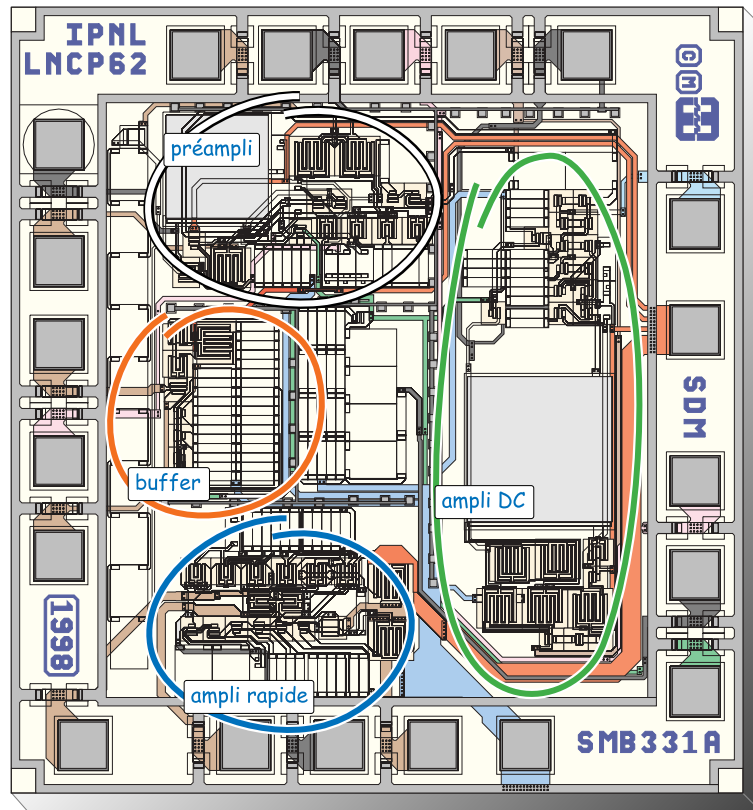


Fig. 26 : Localisation des principales fonctionnalités du chip

Un réseau de contre-réaction $R_f = 50 \text{ k}\Omega$, $C_f = 0,2 \text{ pF}$ est intégré au préamplificateur. Ce réseau est accessible à l'extérieur du boîtier pour en modifier les valeurs. L'assemblage sur circuit imprimé est montré figure 27.



Fig. 27: Montage test

5.2. Réponses cristal - APD avec cette électronique rapide.

La carte Nucleus n'étant pas assez rapide, nous utilisons un oscilloscope numérique (Lecroy LT 384 , 4 Gs/s) comme système d'acquisition.

On note une différence de "peaking time" entre le LSO et le LuAP. Cependant l'exploitation de cette différence n'est pas simple car une dispersion de formes est observées. La figure 28 présente le cas idéal où les deux impulsions sont parfaitement discernables.

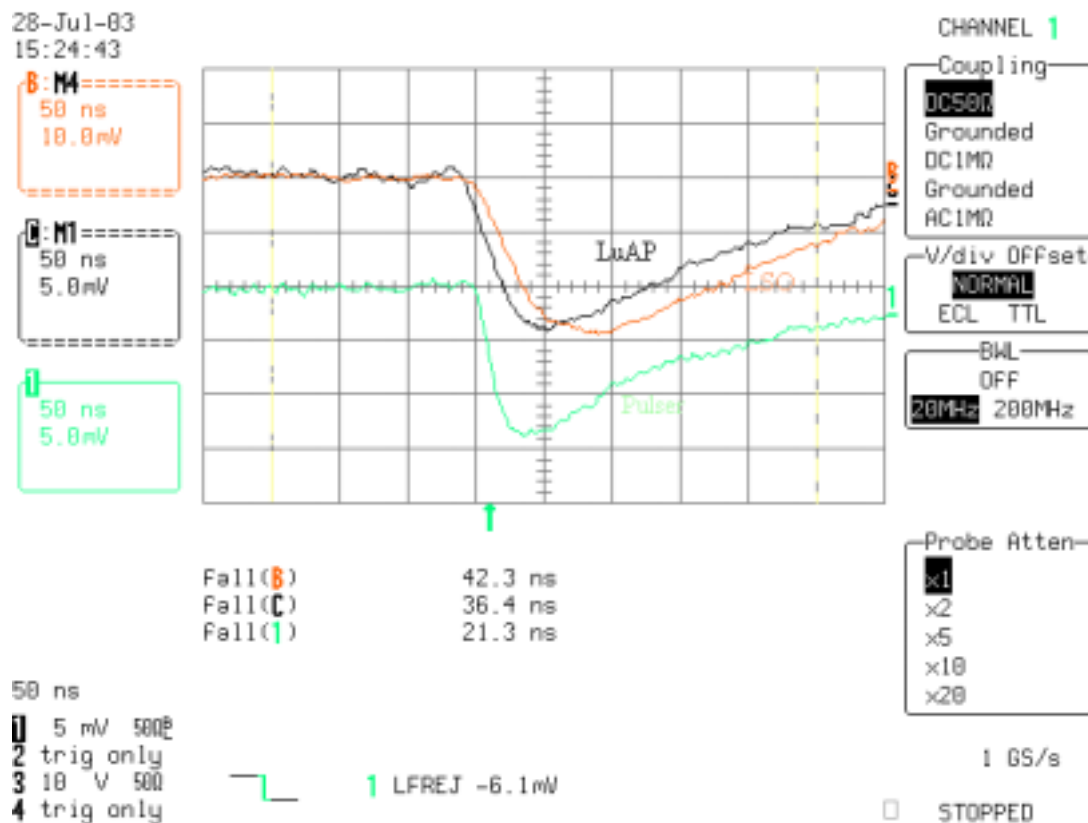


Fig. 28 : Signaux du générateur d'impulsions, de la scintillation du LSO et du LuAP récoltée par une APD et mise en forme par le LNCP-62.

La figure 29 présente l'histogramme des amplitudes maximales (voie A, en bleu) de l'impulsion en sortie de préamplificateur avec un cristal de LSO et une source de Na22.

En orange (voie B), l'histogramme de l'aire sous-tendue par l'impulsion (attention, il faut lire de droite à gauche). On voit le 511 keV ainsi que le 1274 keV.

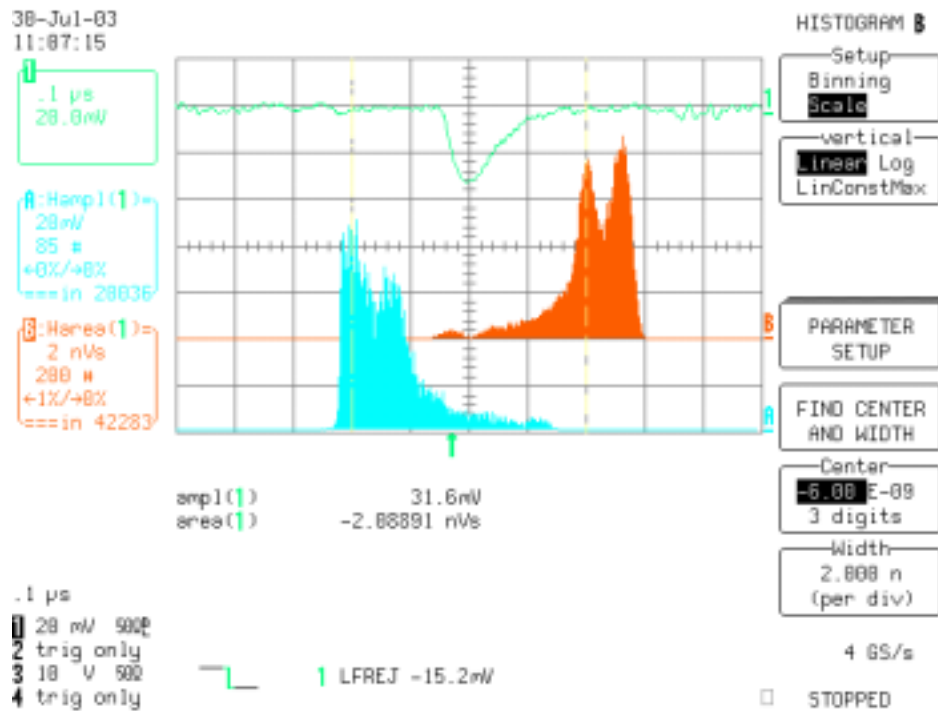


Fig. 29 : Histogrammes d'amplitude et d'aire sous-tendue.

5.3. Formes d'impulsion.

Considérons le système simple suivant : un amplificateur avec un circuit R et C en contre-réaction. Supposons recevoir une impulsion de charge en provenance soit d'un cristal de LSO (décroissance en $\tau = 40$ ns), soit d'un cristal de LuAP (décroissance en $\tau = 17$ ns).

L'impulsion en sortie du préamplificateur est de la forme : $A \left(\frac{\tau}{\tau - RC} \right) (e^{-\frac{t}{RC}} - e^{-\frac{t}{\tau}})$.

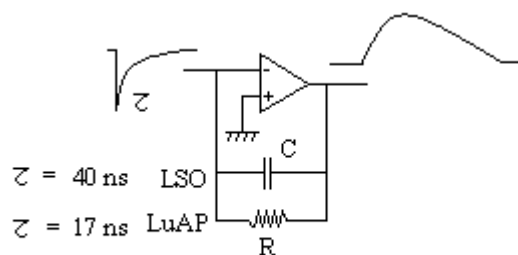


Fig. 30 : Synoptique du système.

Les figures 31 et 32 montrent comment évolue la forme de l'impulsion de sortie dépendante du τ et du réseau de contre-réaction R et C.

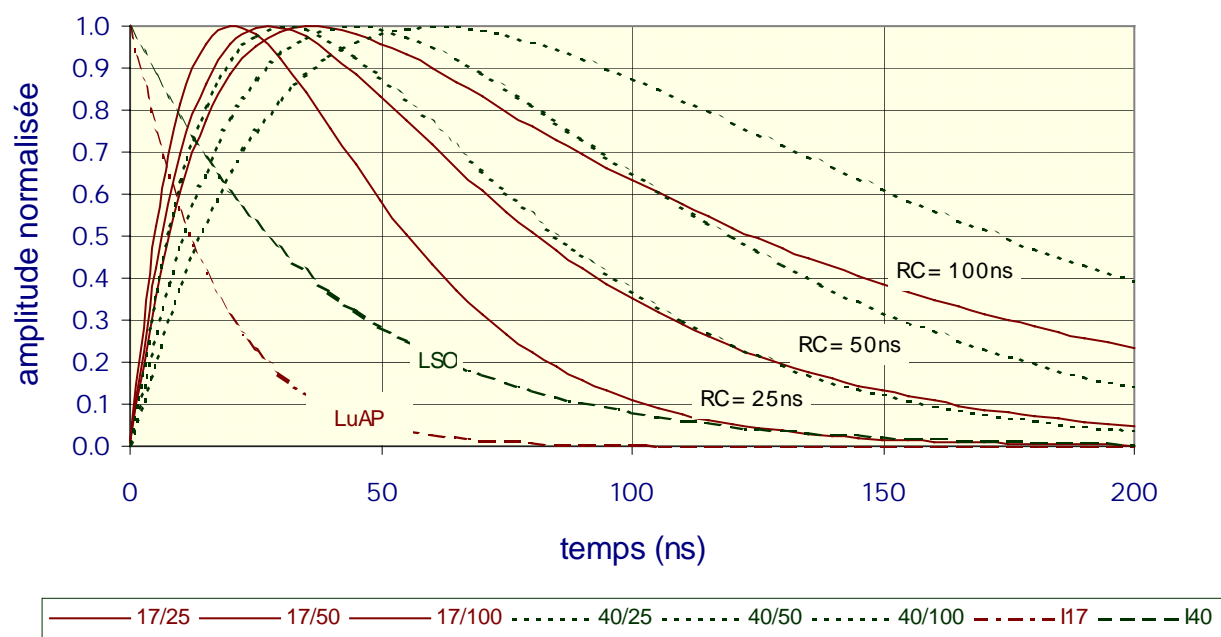


Fig. 31 : Variations de forme pour 3 valeurs de RC.

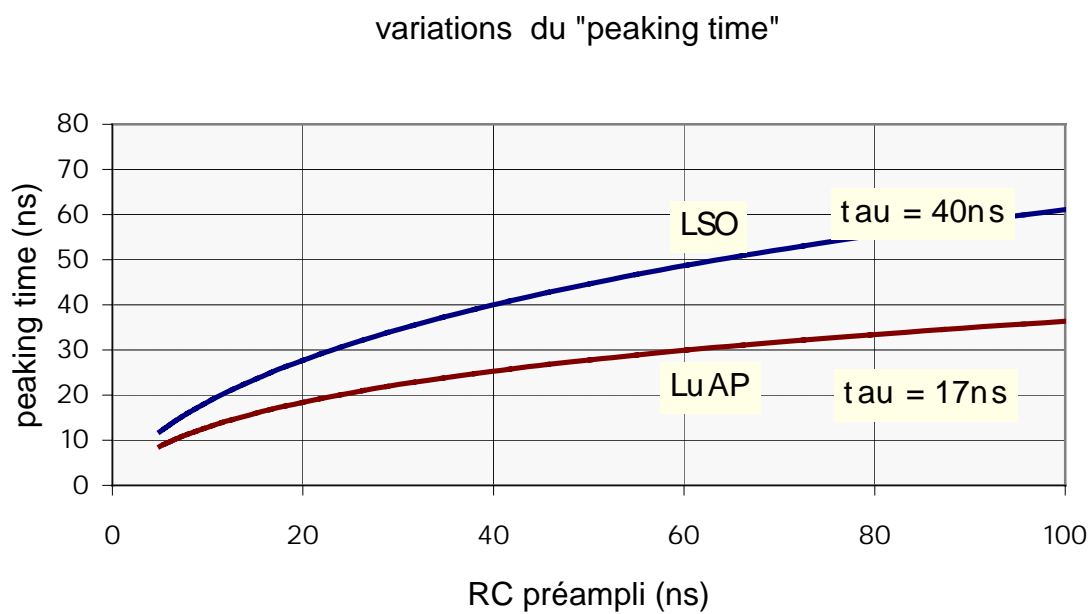


Fig. 32 : Différence entre LSO et LuAP.

Conclusion

Dans un premier temps nous avons caractérisé la matrice d'APDs et montré sa sensibilité à la tension, la température et l'humidité. Si ces paramètres sont parfaitement maîtrisés, les résultats des mesures sont très reproductibles. Le choix d'un fonctionnement à un gain supérieur à 50 sur l'ensemble des cellules n'est pas judicieux.

La matrice d'APDs+cristaux nous a montré qu'elle pouvait résoudre correctement le pic du 511 keV, cellule individuelle par cellule individuelle, autant avec le LSO qu'avec le LuAP, en électronique lente et en électronique rapide. Le nombre d'électrons produits par 511 keV est supérieur à 70000 pour le LSO. La résolution peut atteindre 7 % (LSO).

La distinction LSO/LuAP en se basant uniquement sur les constantes de temps de montée de l'impulsion de charges ne nous semble pas possible par un simple traitement en électronique classique.

L'homogénéité en efficacité lumineuse des cristaux de LuAP doit être assurée pour obtenir une bonne résolution globale.

Bibliographie

[1] Hamamatsu. APD Array 4x8 réf K30-F10049.

[2] Elastomère Sil-Pad 800, BERGQUIST Company.

[3] "Performances of a preamplifier-silicon photodiode readout system associated with large BGO crystal scintillators". M. Goyot et al. NIM A 263 (1988) 180-187.

[4] M. Goyot . Workshop on Electronics for LHC experiments, Lisbon, September 1995, LYCEN 9535.

Remerciements à M. Reynaud et D. Ducimetière pour l'étude et la réalisation mécanique.